



Diseño balanceado de mezcla asfáltica en caliente con pavimento recuperado (RAP) y agregado virgen

Balanced design of hot mix asphalt with reclaimed pavement (RAP) and virgin aggregate

González-Cruz Jacobo

Universidad Autónoma de Querétaro

Correo: ingonzalez27@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-1762-2785>

Pérez-Rea María de la Luz

Universidad Autónoma de Querétaro

Correo: perea@uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0003-0225-9051>

Hernández-Padrón Genoveva

Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada

Correo: genoveva@fata.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0002-1577-7790>

Castellanos-Cordero Alejandro

CEVITER S.A. de C.V., Querétaro

Correo: alexcastellanos7@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-9505-7750>

Resumen

Actualmente se están desarrollando técnicas y procedimientos para lograr diseños de mezclas asfálticas capaces de soportar altos niveles de tránsito mediante el mejoramiento del desempeño del pavimento, por lo que este estudio tiene como objetivo lograr una mezcla que cumpla con las especificaciones de agrietamiento y deformación permanente utilizando una menor cantidad de cemento asfáltico, además de utilizar una mayor cantidad de pavimento asfáltico recuperado (RAP) mediante la implementación de una nueva metodología denominada Diseño Balanceado de Mezcla Asfáltica (BMD), la cual, dentro de sus requerimientos evalúa el rendimiento de la mezcla en cuanto a la deformación permanente (Rueda cargada de Hamburgo) y agrietamiento por tensión indirecta (IDEAL-CT), dando un parámetro del porcentaje máximo y mínimo de contenido asfáltico que podría utilizarse en la mezcla. Para ello, se ensayaron tres mezclas con diferentes porcentajes de asfalto, la primera con el óptimo (5 %) obtenido mediante el análisis volumétrico Superpave, la segunda con una menor cantidad de asfalto (4.5 %) y la tercera con un porcentaje mayor (5.5 %), dando como resultado un rango de asfalto aceptable entre 4.8 % y 4.95 % cumpliendo con los parámetros evaluados. Además, se ensayaron cuatro mezclas combinadas con 30 % de RAP y con diferentes porcentajes de asfalto, la primera con el óptimo (4.65 %), las tres siguientes con porcentajes mayores (5.15 %, 5.65 % y 6.15 %) de los cuales se logró cumplir con el ensayo de deformación permanente; sin embargo, los resultados de la prueba de agrietamiento por tensión indirecta resultaron ligeramente por debajo del mínimo recomendado, cabe mencionar que a las mezclas combinadas con RAP no se les agregó ningún aditivo rejuvenecedor, únicamente se utilizó un asfalto PG 64-22-H. Es importante mencionar que, para el diseño virgen, se logró disminuir el porcentaje de asfalto aceptable respecto al obtenido en el análisis volumétrico, contribuyendo a la optimización del costo monetario en el uso de cementos asfálticos y en las emisiones de agentes contaminantes.

Descriptores: Diseño balanceado, superpave, RAP, IDEAL-CT, CT-Índex.

Abstract

Currently, techniques and procedures are being developed to achieve asphalt mix designs capable of withstanding high levels of traffic by improving pavement performance, so the objective of this study is to achieve a mix that meets the specifications of cracking and permanent deformation using a smaller amount of asphalt cement. The objective of this study is to achieve a mix that meets the specifications for cracking and permanent deformation using less asphalt cement, in addition to using a greater amount of reclaimed asphalt pavement (RAP) by implementing a new methodology called Balanced Asphalt Mix Design (BMD), which among its requirements evaluates the performance of the mix in terms of permanent deformation (Hamburg Loaded Wheel) and indirect stress cracking (IDEAL-CT), giving a parameter of the maximum and minimum percentage of asphalt content that could be used in the mix. For this purpose, three mixes were tested with different asphalt percentages, the first with the optimum (5 %) obtained by Superpave volumetric analysis, the second with a lower amount of asphalt (4.5 %) and the third with a higher percentage (5.5 %), resulting in an acceptable asphalt range between 4.8 % and 4.95 %, complying with the evaluated parameters. In addition, four mixes were tested combined with 30 % RAP and with different percentages of asphalt, the first with the optimum (4.65 %), the next three with higher percentages (5.15 %, 5.65 % and 6.15 %). However, the results of the indirect stress cracking test were slightly below the recommended minimum. It is worth mentioning that no rejuvenating additive was added to the mixes combined with RAP; only PG 64-22-H asphalt was used. It is important to mention that, for the virgin design, it was possible to reduce the percentage of acceptable asphalt with respect to that obtained in the volumetric analysis, contributing to the optimization of the monetary cost in the use of asphalt cements and in the emissions of contaminating agents.

Keywords: Balanced design, superpave, RAP, IDEAL-CT, CT-Index.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura carretera es una de las bases fundamentales para el desarrollo económico de una nación, además de generar una amplia gama de beneficios económicos y sociales. De acuerdo con el Instituto Mexicano de Transporte (2020) la Red Nacional de Caminos hasta el año 2020 en México, se registra un total de 780,511 km de infraestructura vial. De estos, 174,779 km se identificaron como carreteras pavimentadas, de los cuales aproximadamente 85 % son del tipo pavimento flexible, por lo que resulta indispensable implementar criterios de sustentabilidad adecuados para conservar, rehabilitar y reconstruir la red carretera.

Como consecuencia, en los últimos años ha aumentado la concientización sobre el impacto medioambiental, en particular, sobre las emisiones de dióxido de carbono. La normativa medioambiental y la necesidad de una tecnología de construcción ecológica han fomentado las innovaciones y han renovado el interés por la antigua tecnología en la construcción de pavimentos (Gungat *et al.*, 2019). La construcción ecológica, como el reciclaje y los materiales de bajo consumo energético, pueden contribuir en alcanzar el objetivo medioambiental global (Sabahfer & Hossain, 2015; Wang *et al.*, 2020).

Derivado de lo anterior, un número cada vez mayor de organismos, empresas y organizaciones han adoptado la Reutilización de Pavimentos Asfálticos (RAP por sus siglas en inglés) como una alternativa en la reducción de costos de agregados vírgenes y ligantes asfálticos para el diseño de pavimentos nuevos, además de crear un ciclo de reutilización de materiales (Asphalt Institute, 2001; Hugener y Kawakami, 2017; FHWA, 2011).

Sin embargo, el uso de altos porcentajes de RAP en los diseños de mezclas asfálticas está restringido debido a los problemas de agrietamiento y desprendimiento que se generan por la rigidez y trabajabilidad de la mezcla como consecuencia de la oxidación del asfalto en el pavimento (Mohammad *et al.*, 2018). En consecuencia, muchos organismos estatales de todo el mundo no permiten el uso de más de 20 % de RAP en las nuevas mezclas en caliente (Moghaddam & Baaj, 2016; Zaumanis *et al.*, 2013). Por otra parte, Copeland *et al.* (2011) mencionan que la adición de una tasa baja (menos de 20 %) de RAP tiene un efecto mínimo sobre el rendimiento mecánico de la mezcla asfáltica final.

Dado el interés por incrementar la durabilidad, minimizar el agrietamiento y mejorar los diseños volumétricos de mezclas en los pavimentos asfálticos, muchos departamentos estatales de transporte (DOT) están desarrollando o implementando preliminarmente algún

tipo de especificación para el rendimiento de las mezclas asfálticas con el fin de garantizar su durabilidad (Zhou *et al.*, 2021), dentro de los cuales se encuentra el método de Diseño de Mezcla Balanceada (BMD por sus siglas en inglés) como un nuevo enfoque para el diseño de mezclas asfálticas, en el que dentro de sus requerimientos, incluye el aplicar pruebas de desempeño a especímenes debidamente acondicionados que simulen condiciones importantes de servicio del pavimento, tal como el agrietamiento y ahuellamiento (Newcomb, 2018), (Texas A&M Transportation Institute).

A partir de lo anterior, en el presente documento se utilizó el método de diseño de mezcla balanceado con el fin de obtener una combinación adecuada de asfalto, agregado pétreo y pavimento recuperado, buscando mejorar el desempeño de la mezcla en cuanto al agrietamiento y deformación permanente, sin la adición del algún aditivo rejuvenecedor.

MARCO DE REFERENCIA

Dentro de los diseños de pavimentos flexibles se han desarrollado nuevas metodologías para el mejoramiento en el rendimiento de las mezclas asfálticas en caliente y mezclas combinadas con RAP, entre otras. De estas metodologías se encuentra el método de diseño Marshall, Hveem, Superpave, (PT No. 271, IMT), protocolo AMAAC, siendo el más reciente el método de Diseño de Mezcla Balanceada.

Para alcanzar el objetivo de esta investigación se empleó, por sus fortalezas (rendimiento al agrietamiento y deformación permanente), el método de Diseño de Mezcla Balanceado y la metodología Superpave.

EL MÉTODO SUPERPAVE

De acuerdo con Yin & West (2021) la visión original del sistema de diseño de mezclas Superpave era incluir tres niveles, el nivel I se preveía para su uso en pavimentos de bajo tráfico y los requisitos de diseño de la mezcla se basarían principalmente en las propiedades volumétricas tradicionales, el nivel II se utilizaría para la mayoría de los proyectos de tráfico moderado e incluiría requisitos volumétricos más un conjunto limitado de pruebas de rendimiento de la mezcla, y el nivel III sería para pavimentos de alto tráfico y comenzaría con un diseño de mezcla basado en la volumetría, seguido de un conjunto amplio de pruebas de rendimiento avanzadas. De lo anterior, la NCHRP (2011), menciona que no se han podido resolver algunos problemas fundamentales del diseño Superpave, lo que ha llevado a buscar un nuevo enfoque para el diseño de mezclas asfálticas.

EL DISEÑO DE MEZCLA BALANCEADO (BMD)

Derivado de las fallas más comunes que presenta un pavimento en servicio, en septiembre de 2015, el antiguo Grupo de Trabajo de Expertos (ETG, por sus siglas en inglés) en Mezclas y Construcción de la Administración Federal de Carreteras (FHWA) formó un Grupo de Trabajo de Diseño de Mezclas Equilibradas con la finalidad de definir un diseño balanceado de mezclas (BMD por sus siglas en inglés), el cual básicamente consiste en el uso de una prueba de ahuellamiento (rueda cargada de Hamburgo, AASHTO T 324 (AASHTO, 2019) para definir un contenido máximo de asfalto más allá del cual probablemente se producirían fallas de deformación permanente y una prueba de agrietamiento (Indirect tensile asphalt cracking test, ASTM D8225-19 (ASTM, 2019) que indicaría un contenido mínimo de asfalto por debajo del cual podrían producirse fallas por agrietamiento, este marco se conoce como diseño de mezcla balanceado (National Asphalt Pavement Association, 2021).

PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO (RAP)

Para la elaboración de los especímenes combinados con RAP se utilizó el método de reciclaje de mezcla asfáltica en caliente, por ser uno de los métodos más utilizados de acuerdo con la ARRA, la cual consiste en combinar el pavimento asfáltico recuperado con nuevos materiales.

CEMENTOS ASFÁLTICOS SEGÚN SU GRADO DE DESEMPEÑO

El grado de desempeño (PG por sus siglas en inglés) es aquel cuyo comportamiento en los pavimentos está definido por las temperaturas máxima y mínima, las cuales se esperan en el lugar de su aplicación por la intensidad del tránsito y por la velocidad de operación de la carretera; asimismo, a partir de las cuales se asegura un desempeño adecuado para resistir deformaciones, agrietamientos por temperaturas bajas y agrietamiento por fatiga en condiciones de trabajo que se han correlacionado con pruebas y tratamientos especiales para producir simulaciones de envejecimiento a corto y a largo plazo (N-CMT-4-05-004/18), en este estudio el asfalto utilizado se clasificó según su grado de desempeño como un PG 64-22 H, y de acuerdo con su carta de viscosidad el rango de temperatura de mezclado y compactación son de 140 °C – 145 °C y 151.6 °C – 158.1 °C, respectivamente, Figura 1.

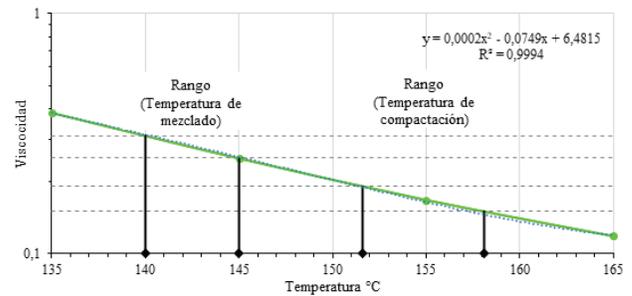


Figura 1. Carta de viscosidad del asfalto (PG 64-22-H)

PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

Los agregados pétreos utilizados provienen del Banco de Material Cemex “Agregados Querétaro”, ubicado en el municipio de Huimilpan, Querétaro, con coordenadas: Latitud: 20.497898°, Longitud: 100.318745°.

Los requisitos de calidad de los agregados pétreos solicitados por normativa se indican en la Tabla 1, en donde se observa el cumplimiento de cada uno de los parámetros requeridos. El agregado pétreo utilizado en el presente trabajo tiene un origen basáltico.

Siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C 136 (ASTM, 2006), se analizaron y determinaron las granulometrías de cada grupo de tamaños de agregados pétreos, dichos resultados se presentan en la Figura 2.

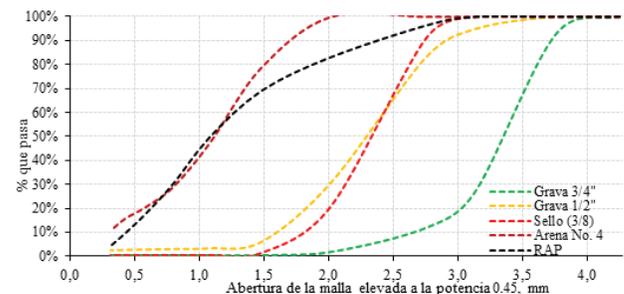


Figura 2. Análisis granulométrico del agregado pétreo

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO

El material asfáltico recuperado se obtuvo de los trabajos de fresado de la Autopista Monterrey-Nuevo Laredo entre los km 32+000 – 35+000.

Posterior a la obtención del material recuperado se determinó el contenido de asfalto del RAP mediante el equipo Rotarex, el cual fue de 3.2 % y 3.3 % respecto a la mezcla y al agregado, respectivamente. Este procedimiento se realizó siguiendo las indicaciones de la norma ASTM 2172 (ASTM, 2005), además, el producto de

la extracción se utilizó para conocer la densidad de los agregados y la granulometría del RAP siguiendo las recomendaciones del reporte 673 del manual de diseño del programa nacional de investigación de carreteras (NCHRP, por sus siglas en inglés), los resultados de las densidades se indican en la Tabla 1 y la granulometría en la Figura 2.

ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE DISEÑO

Con base en la norma ASTM C136/AASHTO T 27, se propusieron las combinaciones granulométricas con la finalidad de cumplir con los parámetros indicados en la normativa antes mencionada, en total se propusieron dos combinaciones diferentes, una para la mezcla virgen (de control) y la segunda para la mezcla combinada con RAP.

DISEÑO BASE

Para el diseño de referencia se consideró un nivel de diseño para un total de 0.3 a < 3 millones de ejes equiva-

lentes (ESAL's) con el objetivo de establecer los parámetros a evaluar siguiendo las recomendaciones de la metodología Superpave. Para ello, la granulometría de diseño se definió a partir del ajuste de la curva combinada de los pétreos utilizando agregados minerales 100 % de origen virgen, los cuales fueron grava de 3/4", sello de 3/8" y arena, en una proporción de 25 %, 30 % y 45 %, respectivamente (Figura 3). Posterior al cumplimiento de la granulometría, se determinó el contenido óptimo de asfalto con el objetivo de alcanzar un volumen de vacíos (Va) en la mezcla de 4 %, además, se verificó que se cumplieran con demás parámetros volumétricos establecidos en la metodología, como: Los vacíos del agregado mineral (VAM), vacíos llenos con Asfalto (VAF), porción de fino (DP), gravedad específica de la mezcla compacta (Gmb) y la gravedad específica teórica máxima (Gmm).

Tabla 1. Caracterización de los agregados pétreos

Propiedad física	Norma	Grava 3/4"	Sello 3/8"	Arena Núm. 4	Grava RAP	Arena RAP	Especificación
Gravedad Específica Bruta, Gsb		2.819	2.805	2.670	2.791	2.598	> 2.4
Gravedad Específica Aparente, Gsa	ASTM C 127 (2015)	2.904	2.900	2.898	2.867	2.847	-
Absorción, %		1.04 %	1.20 %	2.96 %	1.64 %	2.54 %	-
Pruebas en el agregado fino							
Angularidad, %	AASHTO T 304 (2017)						40 % mín
Equivalente de Arena, %	ASTM D 2419 (2022)			78 %			50 % mín
Azul de Metileno, mg/g	AMAAC RA 05 (2010)			15			15 máx
Pruebas en el agregado grueso							
Desgaste de Los Ángeles, %	ASTM C 131 (2006)	8.2 %					30 % máx.
Micro-Deval, %	AASHTO T 327 (2022)	10.1 %					15 % máx.
Intemperismo Acelerado (Sulfato Sodio), %	ASTM C88 (2013)	4.7 %					15 % máx.
Partículas con 1 Cara Fracturada, %		100.0 %					100 % mín.
Partículas con 2 ó más Caras Fracturadas, %	ASTM D 5821 (2013)	100.0 %					90 % mín.
Partículas Planas y alargadas, %	ASTM D 4791 (2019)	8.9 %					10 % máx.
Partículas Alargadas, %		7.6 %					10 % máx.
Adherencia (AMAAC), %	AMAAC RA 08 (2008)	84.0 %					90 % mín.

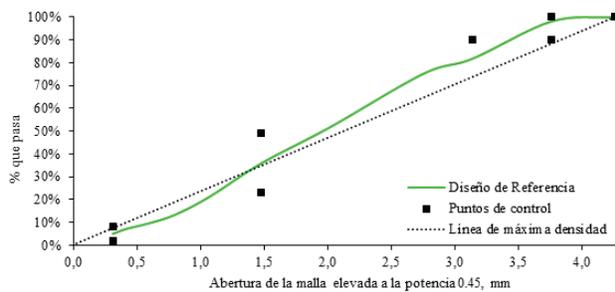


Figura 3. Distribución granulométrica de la mezcla de control T. 3/4"

Para encontrar el contenido óptimo de asfalto se evaluaron las propiedades volumétricas de 4 mezclas con distintas proporciones de ligante (PB), dichos resultados se presentan en la Tabla 2, en el cual se observa que con 5 % de ligante asfáltico se cumple con los parámetros requeridos.

DISEÑO CON RAP

Se propuso una mezcla adicionada con RAP en una proporción de 30 % respecto al peso total de la mezcla, esto con base en que la mayoría de las investigaciones se centran en porcentajes por debajo de 20 % de RAP, por lo que se optó por analizar el comportamiento de

una mezcla combinada con pavimento recuperado mayor a 20 % mediante el ensayo de agrietamiento y deformación permanente, siguiendo las recomendaciones del reporte 673 del manual NCHRP; la granulometría propuesta se presenta en la Figura 4. Para conocer el porcentaje óptimo de asfalto se parte del óptimo del diseño base (5 %), y se le descuenta el porcentaje aportado por el RAP (3.2%). Los resultados del análisis volumétrico se muestran en la Tabla 3, en donde se aprecia que el contenido de asfalto óptimo se encuentra entre 5% y 4.36%, es decir, menor que el del diseño base; por lo tanto, al realizar una interpolación, el óptimo resultó ser de 4.65 %, cabe mencionar que el agregado del RAP tuvo una menor absorción de asfalto dado a que ya presentó este efecto en su diseño original.

Finalmente, en la Figura 5 se presenta de manera gráfica el porcentaje óptimo de asfalto con base en el análisis volumétrico para el diseño de referencia y para el diseño combinado con RAP.

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA MEZCLA

DEFORMACIÓN PERMANENTE

Para identificar fallas prematuras debidas a la susceptibilidad en la formación de roderas en mezclas asfálticas

Tabla 2. Análisis volumétrico de la mezcla

Esp. Núm.	PB, %	Gmm	W seco (A)	W sum (B)	W ssd	Vol.	Prom. Gmb	Gmm % @ Ndis	Va, %	VAM, %	VFA, %	Pbe, %	DP	Gmb Prom @ Nini	% Gmm @ Nini
1A	4.50	2.636	4698.2	2803.2	4705.8	1902.6	2.467	93.6 %	6.4	14.8	56.7	3.5	1.4	2.228	84.5 %
1B	4.50		4694.5	2800.1	4704.2	1904.1									
1A	4.80	2.623	4853.1	2906.7	4863.1	1956.4	2.486	94.8 %	5.2	14.4	63.6	3.8	1.3	2.257	86.0 %
1B	4.80		4869.9	2921.9	4877.2	1955.3									
3A	5.00	2.615	4882.5	2942.3	4889.7	1947.4	2.509	96.0 %	4.0	13.8	70.8	4.0	1.3	2.272	86.9 %
3B	5.00		4897.6	2954.2	4904.2	1950.0									
4A	5.50	2.593	4884.2	2956.2	4889.2	1933.0	2.524	97.3 %	2.7	13.7	80.6	4.5	1.1	2.263	87.2 %
4B	5.50		4864.3	2940.8	4869.7	1928.9									

Tabla 3. Análisis de las propiedades volumétricas de la mezcla con RAP

Esp. Núm.	PB, %	Gmm	W seco (A)	W sum (B)	W ssd	Vol.	Prom. Gmb	Gmm % @ Ndis	Va, %	VAM, %	VFA, %	Pbe, %	DP	Gmb Prom @ Nini	% Gmm @ Nini
1A	5.00	2.598	4838.3	2911.8	4841.5	1929.7	2.506	96.5%	3.5	10.6	66.5	2.9	1.1	2.269	87.3%
1B	5.00		4852.4	2919.2	4856.3	1937.1									
2A	4.36	2.625	4829.5	2908.8	4833.3	1924.5	2.511	95.6 %	4.4	9.8	55.4	2.2	1.4	2.273	86.6 %
2B	4.36		4824.8	2908.8	4829.7	1920.9									

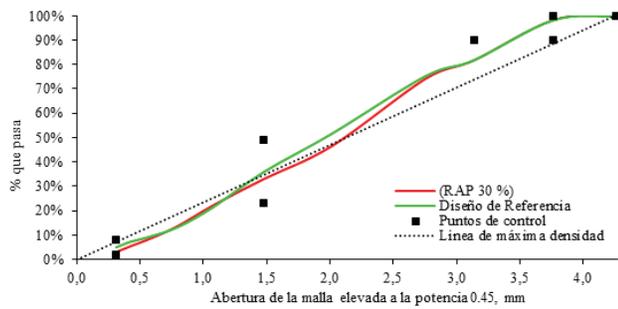


Figura 4. Distribución granulométrica de la mezcla adicionada con RAP

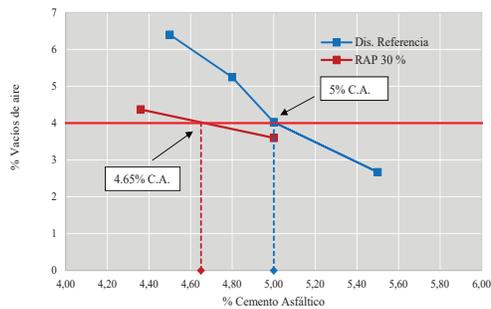


Figura 5. Estimación del porcentaje óptimo de asfalto

a una rigidez inadecuada, en la debilidad de la estructura del agregado pétreo o adhesión inadecuada entre el asfalto y el agregado, se llevó a cabo la prueba de rueda cargada de Hamburgo de acuerdo con lo establecido en el procedimiento AASHTO T 324 (AASHTO, 2019) “Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures”.

ÍNDICE DE AGRIETAMIENTO (CT INDEX)

El ensayo IDEAL-CT (*Indirect tensile asphalt cracking test*) se ejecuta sobre probetas cilíndricas a las condiciones de carga, temperatura y geometría que señala la especificación ASTM D8225-19 (ASTM, 2019) “Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature”, cuyo propósito es obtener un parámetro de agrietamiento (CT index) a partir de una curva de carga-desplazamiento, de tal forma que sea posible determinar la resistencia al agrietamiento de las mezclas a una temperatura intermedia, la cual puede variar dentro de un rango de 5 °C a 35 °C. En la Figura 6 se muestra la curva típica de carga-desplazamiento, donde usando las ecuaciones 1 y 2 se puede determinar el índice de Tolerancia al Agrietamiento (CT-índice), siendo esto una implementación del diseño de mezcla balanceado.

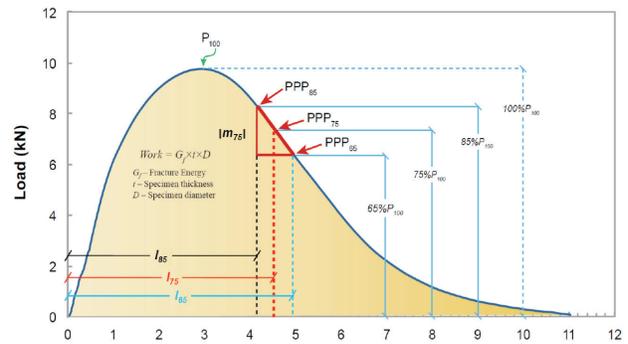


Figura 6. Curva carga-desplazamiento típico del ensayo de agrietamiento IDEAL-CT (ASTM D8225-19), (ASTM, 2019)

Para especímenes con espesor de 62 mm:

$$CTindex = \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \frac{l_{75}}{D} \tag{1}$$

Para especímenes con espesor de 62 mm±1 mm:

$$CTindex = \frac{t}{62} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \frac{l_{75}}{D} \tag{2}$$

Donde:

- G_f = energía de fallo calculada dividiendo el trabajo de fallo (área bajo la curva carga-desplazamiento) por el área de la sección transversal de la probeta
- $|m_{75}|$ = valor absoluto de la pendiente post-pico m_{75}
- l_{75} = desplazamiento a 75 % de la carga post-pico
- D = diámetro de la probeta
- t = espesor de la probeta

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La evaluación del ahuellamiento se realizó mediante el equipo de rueda cargada de Hamburgo (Figura 7), bajo condiciones adecuadas indicadas en la norma (AASHTO T-324), (AASHTO, 2019).

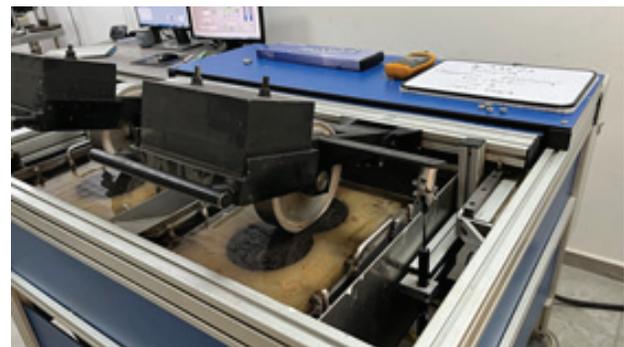


Figura 7. Ensayo de ahuellamiento mediante Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO-T-324), (AASHTO, 2019)

Para evaluar la susceptibilidad a la formación de roderas se realizaron tres mezclas con distintos porcentajes de asfalto.

El primero con el porcentaje óptimo de asfalto (5 %) el cual presentó una profundidad de rodera de 12.71 mm en promedio, sin embargo para fines de control consideramos una rodera máxima permisible de 12.5 mm como lo recomienda el Departamento de Transporte de Texas, por lo tanto, esta mezcla no cumplió con este parámetro.

El segundo diseño se realizó disminuyendo el porcentaje de asfalto en 0.5 %, con esta nueva mezcla se obtuvo una profundidad de rodera de 8.85 mm, menor que el máximo permisible, por lo que se consideró como válido.

El tercer diseño se realizó con un porcentaje de asfalto mayor al óptimo, tal y como lo indica la metodología del diseño de mezcla balanceada, pero la profundidad de rodera obtenida fue de 16.56, muy por arriba del permisible, lo que significa que la mezcla diseñada con el porcentaje óptimo de asfalto no cumplió con el parámetro requerido. Por otra parte, al disminuir el porcentaje de asfalto en una proporción de 0.5 % se logró cumplir con lo especificado, no obstante, se observó que al disminuir el porcentaje de asfalto a la mezcla, esta tiende a volverse rígida, por lo que es necesario evaluar la resistencia al agrietamiento. Los resultados del ensayo de rodera se presentan en la Tabla 4.

El comportamiento de las roderas en las mezclas a 20,000 pasadas puede observarse en la Figura 8.

Además, se evaluó la susceptibilidad a la formación de roderas a la mezcla combinado con RAP con cuatro distintos porcentajes de asfalto.

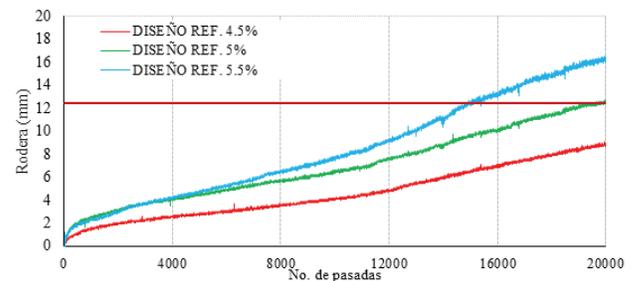


Figura 8. Determinación de la profundidad de rodera HWTT para el diseño Virgen

El primero con un porcentaje óptimo de asfalto de 4.65 %, obtenido mediante el análisis volumétrico, el cual presentó un ahuellamiento de 2.81 mm en promedio, muy por debajo del máximo permitido, por lo que se consideró como bueno. Partiendo de este resultado las tres mezclas siguientes se realizaron en proporciones de 0.5 % más de asfalto respecto al óptimo, es decir, 5.15 %, 5.65 % y 6.15 %, esto con la finalidad de conocer en qué medida aumentaba la formación de roderas.

Los resultados se presentan en la Tabla 5, donde se observa que todas resultaron favorables (< 12.5 mm) ya que, al no utilizar algún aditivo rejuvenecedor, las propiedades del asfalto del RAP contribuyen a rigidizar la mezcla, volviéndolo resistente a la formación de roderas.

Por otra parte, al adicionar altos porcentajes de RAP a una mezcla se presenta el efecto del fenómeno de agrietamiento, que es uno de los principales deterioros que presenta un pavimento y que, además, son los que más daños le pueden llegar a ocasionar.

En este trabajo, al emplear altos porcentajes de RAP en la mezcla, resulta sumamente importante evaluar

Tabla 4. Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo para la mezcla de control (HWTT-AASHTO T 324), (AASHTO, 2019)

Designación de la mezcla	Contenido asfáltico (%)	Vacíos de aire (%)	Rodera (1)	Rodera (2)	Promedio rodera (mm)
Diseño (Menor % de asfalto)	4.5	7.08	8.62	9.09	8.85
Mezclas de control Diseño de Referencia (% óptimo de asfalto)	5	6.62	12.74	12.67	12.71
Diseño (Mayor % de asfalto)	5.5	7.50	16.36	16.75	16.56

Tabla 5. Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo para la mezcla combinado con RAP (HWTT- AASHTO T 324), (AASHTO, 2019)

Designación de la mezcla	Contenido asfáltico (%)	Vacíos de aire (%)	Rodera (1)	Rodera (2)	Promedio rodera (mm)
Diseño (% óptimo de asfalto)	4.65	6.62	2.59	3.04	2.81
Mezclas combinado con 30 % de RAP	5.15	7.35	5.6	4.22	4.91
	5.65	6.84	8.28	6.81	7.54
	6.15	7.50	9.07	10.27	9.67

este comportamiento para determinar el porcentaje máximo de pavimento recuperado a utilizar en una mezcla antes de llegar a la falla prematura por agrietamiento.

El comportamiento de las roderas en las mezclas puede observarse en la Figura 9, evidenciando lo rígido que se vuelven las mezclas que contienen RAP.

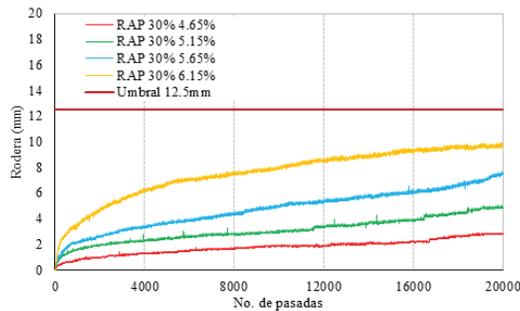


Figura 9. Determinación de la profundidad de rodera HWT para el diseño combinado con RAP

Posteriormente, se realizó el ensayo de agrietamiento por tensión indirecta (IDEAL-CT) (Figura 10) para conocer el índice de agrietamiento de las mezclas propuestas, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM D8225-19, siendo esta prueba una revisión propuesta por el método de Diseño Balanceado, que a diferencia del método Superpave, no se revisa este parámetro.



Figura 10. Ensayo de agrietamiento por tensión indirecta (IDEAL-CT, ASTM D8225-19), (ASTM, 2019)

La revisión del índice de agrietamiento partió del diseño de referencia diseñado con un 5 % de asfalto, para el cual se obtuvo un índice de tolerancia al agrietamiento

de 87.42, cabe mencionar que para este parámetro actualmente no existe alguna norma que nos indique el rango mínimo de aceptación, únicamente existen recomendaciones de diferentes departamentos de transporte en Estados Unidos (DOT's por sus siglas en inglés) obtenidos mediante tramos de prueba, los cuales se encuentran registrados en el Reporte 21-03 del Centro Nacional de la Tecnología del Asfalto (NCAT, por sus siglas en inglés), por lo que resulta novedoso revisar el desempeño de las mezclas diseñadas con materiales de la región con referente al agrietamiento para su implementación futuro.

De la Tabla 6 se puede analizar que a medida que se reduce el porcentaje de asfalto en la mezcla, esta tiende a ser menos resistente, por otra parte, al adicionarle mayor porcentaje de asfalto, aumenta la resistencia al agrietamiento, es decir, se vuelve más flexible. Sin embargo, hay que considerar que mientras más asfalto se le adiciona se vuelve más propenso a presentar fallas prematuras por roderas.

En la Figura 11 se observa el comportamiento de las mezclas con diferentes porcentajes de asfalto, dentro de los cuales, el menor porcentaje de asfalto soporta una mayor carga a diferencia de las otras dos; sin embargo, la pendiente de caída en la falla es mayor, por lo que el índice de agrietamiento resulta ser menor. Por otra parte, la mezcla con mayor porcentaje de asfalto tiende a resistir menor carga, pero se observa que la pendiente después de la falla es menor, por lo tanto, presenta un mayor índice de agrietamiento.

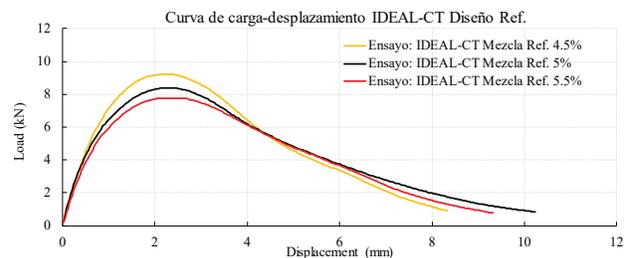


Figura 11. Curva de carga-desplazamiento IDEAL-CT para el diseño Base

Tabla 6. Resultados del ensayo de agrietamiento por tensión indirecta para la mezcla de control (IDEAL-CT)

Designación de la mezcla	Contenido Asfáltico (%)	Vacíos de aire (%)	Carga máxima (kN)	Índice de tolerancia al agrietamiento (CT Index)
Diseño (Menor % de asfalto)	4.5	6.81	9.99	48.39
Mezclas de control Diseño de referencia (% óptimo de asfalto)	5	7.11	8.41	87.42
Diseño (Mayor % de asfalto)	5.5	7.13	7.96	95.95

Del mismo modo se ensayaron las mezclas combinadas con 30 % de RAP en las mismas proporciones de asfalto que en el ensayo de ahuellamiento.

Los resultados se presentan en la Tabla 7, obteniendo un índice de agrietamiento muy por debajo que el de la mezcla de referencia (mezcla virgen), este resultado era de esperarse, ya que al utilizar un porcentaje bastante alto de pavimento recuperado, la mezcla tiende a volverse rígida, por lo tanto, tiende a grietarse con mayor facilidad. Por otro lado, se observa que las mezclas con mayor porcentaje de asfalto presentan un aumento gradual en la resistencia al agrietamiento, volviéndose más flexibles, no obstante, en la mezcla con 6.15 % de asfalto la apariencia física fue muy notable en el exceso de asfalto, por lo que no se realizaron mezclas con mayor contenido asfáltico.

Al igual que en las mezclas vírgenes, el comportamiento en las mezclas combinadas con RAP presentó el mismo efecto, es decir, las mezclas con menor contenido asfáltico toleraron una mayor carga, pese a que la pendiente después de la falla era mayor, por ende, la resistencia al agrietamiento resultó ser menor (Figura 12).

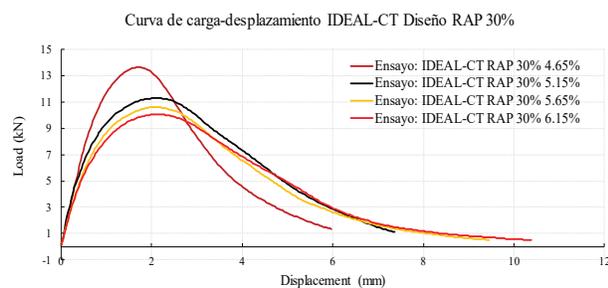


Figura 12. Curva de carga-desplazamiento IDEAL-CT para el diseño combinado con RAP

Finalmente se realizó una comparativa entre los resultados de la prueba de ahuellamiento y el índice de agrietamiento (Figura 13), con el objetivo de conocer un rango aceptable de asfalto para la mezcla y dentro del cual no presentara fallas por deformación permanente ni por agrietamiento, tal y como lo recomienda el Diseño Balanceado de Mezcla Asfáltica, considerando parámetros conocidos como la rodera máxima permitida

(12.5 mm, Departamento de Transporte de Texas) y un índice de agrietamiento mínimo de 70 (adimensional), como lo recomienda el Departamento de Transporte de Virginia (VDOT's) establecido en el Reporte 21-03 del NCAT.

Partiendo de estos parámetros se obtiene que: Para la mezcla de referencia con 5 % de contenido asfáltico se logró cumplir con el índice de agrietamiento, sin embargo, presenta una rodera mayor al máximo permitido, por lo que esta mezcla no se considera como válida.

Para la mezcla con 4.5 % de asfalto se cumple satisfactoriamente con la rodera, sin embargo, no se cumple con el índice de agrietamiento, por lo que esta mezcla también se descarta.

No está de más mencionar que, aunque la mezcla con 5.5 % de contenido asfáltico no cumple con el parámetro de rodera, presenta una mejora en el índice de agrietamiento muy por arriba del mínimo requerido, pero también se descarta la mezcla.

De esta manera, al analizar el rango entre 4.8 % y 4.95 % de contenido asfáltico, se observa que es el rango en el cual se cumple satisfactoriamente con estos dos parámetros. Cabe resaltar que con una cantidad menor de asfalto que el óptimo se logró obtener un buen desempeño de la mezcla. Así este rango de contenido asfáltico podría ser el viable para considerarlo como mezcla de trabajo.

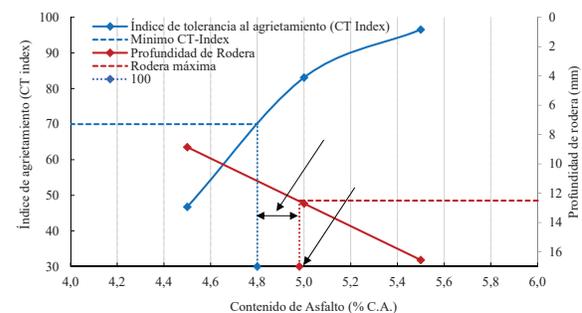


Figura 13. Resistencia al agrietamiento y a la deformación permanente en función del contenido de asfalto (Diseño Base)

Siguiendo el mismo criterio de análisis se revisaron los resultados de las mezclas combinadas con RAP (Figura

Tabla 7. Resultados del ensayo de agrietamiento por tensión indirecta para la mezcla combinado con RAP (IDEAL-CT)

Designación de la mezcla	Contenido Asfáltico (%)	Vacíos de aire (%)	Carga máxima (kN)	Índice de tolerancia al agrietamiento (CT-Index)	
Diseño (% óptimo de asfalto)	4.65	7.05	14.06	38.96	
Mezclas combinado con 30 % de RAP	5.15	6.64	11.3	48.2	
	Diseño (Mayor % de asfalto)	5.65	7.36	10.63	56.12
	6.15	6.9	9.95	62.32	

14) en donde se observa que todas las mezclas cumplieron satisfactoriamente con el parámetro requerido por rodera. Por otro lado, para el caso del índice de agrietamiento no se logró cumplir con el objetivo, ya que todas presentaron valores por debajo del mínimo permitido, aunque se notó un aumento significativo al dosificarle mayor porcentaje de asfalto, a tal grado que se llegó a un valor cercano al mínimo utilizando 6.15 % de contenido asfáltico, pero con este porcentaje la apariencia de la mezcla no era el adecuado, por lo que no se obtuvo un porcentaje de asfalto viable para cumplir con los parámetros.

Cabe resaltar que no se utilizó ningún aditivo rejuvenecedor en la mezcla, únicamente se utilizó un asfalto 64-22-H para todos los diseños.

Aunado a esto, West *et al.* (2018) (NCHRP, 2018) mencionan que en algunos tramos de pruebas se obtuvieron índices de agrietamiento alrededor de 30 y que, además, mostraron buen comportamiento, por lo que resulta viable utilizar este tipo de mezclas para pavimentos con una intensidad de tráfico ligeramente moderados, ya que los valores de agrietamiento obtenido son mayores a 30.

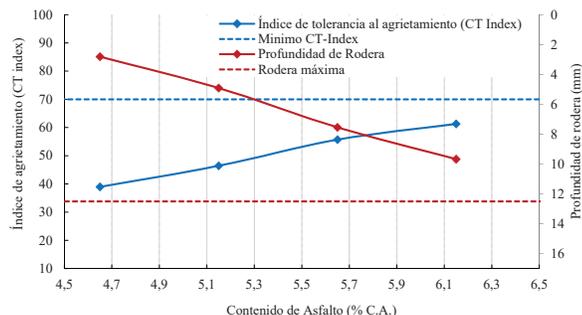


Figura 14. Resistencia al agrietamiento y a la deformación permanente en función del contenido de asfalto (diseño combinado con RAP)

CONCLUSIONES

Considerando los criterios de evaluación del diseño balanceado en una mezcla asfáltica, se obtiene que es posible utilizar un porcentaje de asfalto diferente al obtenido mediante el análisis volumétrico de la metodología Superpave, ya que en la mayoría de los casos es favorable, permitiendo un rango más amplio en la selección del porcentaje asfáltico, el cual puede ser menor al “óptimo” contribuyendo en la optimización del uso del ligante asfáltico y los costos de producción, sumándole la disminución en emisiones de agentes contaminantes al medio ambiente.

Por otra parte, se obtiene que es posibles utilizar cantidades considerables de pavimento asfáltico recuperado (alrededor de 30 %) en carreteras con un nivel

de tránsito de baja intensidad, cumpliendo con los lineamientos de calidad, además de contribuir en la reducción del uso de materiales de origen 100 % vírgenes, los cuales pueden llegar a generar cantidades exorbitantes de partículas contaminantes al medio ambiente durante su explotación, considerando también que son recursos naturales no renovables.

Aunado a esto, diseñar una mezcla asfáltica con altos porcentajes de RAP por el método Superpave resulta ser poco factible, ya que la metodología no revisa el fenómeno de agrietamiento en las mezclas, por lo que resulta interesante el nuevo enfoque del Diseño Balanceado, ya que el método propone un ensayo para medir el índice de tolerancia al agrietamiento (IDEAL-CT). Este resulta ser práctico, rápido y sencillo de realizar, sumando que el equipo de prueba no requiere ser tan sofisticado, a diferencia de los otros métodos de ensayo para medir el agrietamiento, ya que suelen ser demasiado tardados y costosos. De esa forma, también se requieren equipos especiales para su realización; por lo que es importante aportar información de esta prueba para las bases de una normativa que pueda servir como referencia en futuros desarrollos científicos y tecnológicos sustentables.

Aunque actualmente no existe una normativa en donde se indiquen parámetros mínimos del índice de agrietamiento (CT-Índice), existen recomendaciones de algunos departamentos de transportes de Estados Unidos tales como Virginia, Texas, Oklahoma, entre otros, que nos dan pauta para los criterios de aceptación o rechazo en el diseño de mezclas bajo esta premisa.

De lo anterior se recomienda realizar una mezcla con un ligante asfáltico diferente al utilizado en el presente trabajo, además de utilizar porcentajes de RAP entre 15 % y 30 % para evaluar su comportamiento. También se recomienda utilizar algún aditivo rejuvenecedor en las mezclas combinadas con RAP para evaluar si existe mejora significativa en el índice de agrietamiento.

REFERENCIAS

AASHTO (2017). AASHTO T 304-17. Standard method of test for uncompacted void content of fine aggregate.

AASHTO (2019). AASHTO T 324-19. Standard method of test for hamburg wheel-track testing of compacted asphalt mixtures.

AASHTO (2022). AASHTO T 27-22. Sieve analysis of fine and coarse aggregates / sieve analysis of aggregates.

AASHTO (2022). AASHTO T 327-22. Standard method of test for resistance of coarse aggregate to degradation by abrasion in the micro-deval apparatus.

Asociación Mexicana del Asfalto, A. C. (2008). Recomendación AMAAC RA 08/2008. Ciudad de México.

- Asociación Mexicana del Asfalto, A. C. (2010). Recomendación AMAAC RA-05/2010. Ciudad de México.
- Asphalt Institute. (2001). SuperPave Mix Design.
- ASTM (2005). ASTM D 2172-05. Standard test methods for quantitative extraction of bitumen from bituminous paving mixtures.
- ASTM (2006). ASTM C 131-06. Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine.
- ASTM (2006). ASTM C 136-06. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.
- ASTM (2013). ASTM C 88-13. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.
- ASTM (2013). ASTM D 5821-13. Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate.
- ASTM (2015). ASTM C 127-15. Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate.
- ASTM (2019). ASTM D 4791-19. Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate.
- ASTM (2019). ASTM D 8225-19. Standard test method for determination of cracking tolerance index of asphalt mixture using the indirect tensile cracking test at intermediate temperature.
- ASTM (2022). ASTM D 2419-22. Standard test method for sand equivalent value of soils and fine aggregate.
- Copeland, A., McDaniel, R., Shah, A., & Huber, G. (2012). Effects of reclaimed asphalt pavement content and virgin binder grade on properties of plant produced mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), 1-22. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2012.657066>
- FHWA (2011). *High reclaimed asphalt pavement use*. McLean: Research, Development, and Technology.
- Gungat, L., Othman-Hamzah, M., Yusoff, N., & Goh, S. (2019). Design and properties of high reclaimed asphalt pavement with RH-WMA. *Materials Science and Engineering*, 512(1), <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/512/1/012055>
- Hugener, M., & Kawakami, A. (2017). Simulating repeated recycling of hot mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*. 18(sup2), 76-90. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1304263>
- Moghaddam, T., & Baaj, H. (2016). The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. *Construction and Building Materials*, 114, 805-816.
- Mohammad, A., Mohammad, S., & Ankit, S. (2018). Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 168, 61-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.079>
- National Asphalt Pavement Association (2021). *Balanced mix design resource guide*. Greenbelt: national center for asphalt technology.
- National Cooperative Highway Research Program (2011). *A manual for design of hot mix asphalt with commentary*. Washington, D. C.: Transportation Research Board.
- Newcomb, D. (2018). *Balanced design of asphalt mixtures*. Texas: Texas A&M Transportation Institute.
- Sabahfer, N., & Hossain, M. (2015). Effect of fractionation of reclaimed asphalt pavement on properties of superpave mixtures with reclaimed asphalt pavement. ASTM International. Recuperado de <https://doi.org/10.1520/ACEM20140036>
- SCT (2020). Instituto Mexicano del Transporte. Recuperado de la Red Nacional de Caminos en <https://www.gob.mx/imt/es/articulos/aumenta-en-29-819km-la-longitud-total-de-la-red-nacional-de-caminos?idiom=es>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2018). N-CMT-4-05-004/18, *Calidad de cementos asfálticos según su grado de desempeño* (PG). Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Wang, L., Dai, Z., Zhao, K., & Dong, Z. (2020). Study on the influence of RAP content on the performance of plant mix hot recycled asphalt mixture. *Construction Engineering and Management*.
- West, R., Rodezno, C., Leiva, F., & Yin, F. (2018). (Project 20-07). Development of a framework for balanced mix design. National cooperative highway research program.
- Yin, F., & West, R. (2021). NCAT Report 21-03. Auburn: National Center for Asphalt Technology.
- Zaumanis, M., Mallick, R., & Frank, R. (2013). Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100 % reclaimed asphalt pavement mixtures. *Transportation Research Board*, 2370(1), 17-25. <https://doi.org/10.3141/2370-03>
- Zhou, F., Mogawer, W., & Steger, R. (2021). Development of a coherent framework for balanced mix design and production quality control and quality acceptance. *Construction and Building Materials*, 287, 123020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123020>

Cómo citar:

González-Cruz, J., Pérez-Rea, M. de la L., Hernández-Padrón, G., & Castellanos-Cordero, A. (2024). Diseño balanceado de mezcla asfáltica en caliente con pavimento recuperado (RAP) y agregado virgen. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 25(01), 1-11. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.1.008>